第40卷 第9期
2023年9月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 9
Sep. 2023

基于生态资产的湟水流域生态保护效益评估

孙冰清[1]， 杜加强[1]， 毛佳琳[1,2]， 张 静[1,2]， 盛芝露[1]， 张杨成思[1]

（1. 中国环境科学研究院,北京 100012；2. 兰州大学生态学院,甘肃 兰州 712100）

摘 要：生态资产是能够为人类带来效益和提供服务的生态系统,评估生态资产变化可以从客观上了解生态保护效果。地处青藏高原与黄土高原过渡区的湟水流域生态环境脆弱敏感,人类活动强度大,是21世纪以来生态保护政策与工程实施的重点区域。本文通过核算湟水流域生态资产的存量与流量,全面分析流域生态资产特征及其变化,以探究生态保护效益。结果表明:(1) 2020年湟水流域生态资产综合指数为30.98,高于青海省平均水平,生态资产流量价值为1.07×10^{11}元;2000—2020年生态资产质量整体提升,流量价值增益343.11%。(2) 社会经济因素对生态资产增益影响力大。(3) 流域内生态资产稳步提升,生态保护修复已取得一定成效,但生态资产空间分异显著,局地生态保护压力依然很大。该研究对掌握湟水流域生态状况、指导生态资产保护具有重要意义。

关键词：生态资产；生态资产损益；生态保护效益；湟水流域

生态系统不仅为人类生活提供必不可少的物质产品,也在调节自然环境中发挥着主导作用[1]。生态资产是在一定时间、空间范围内和技术经济条件下给人类带来效益的生态系统[2],包含作为存量的自然资本和作为流量的生态系统服务价值[3]。随着全社会对生态保护的重视,为了维护自然生态环境安全,认识和了解生态系统状况及变化,生态资产评估受到广泛关注。《中共中央关于全面深化改革若干重大问题的决定》和《生态文明体制改革总体方案》提出要建立适合我国的生态系统资产核算体系,党的十八大、十九大报告将生态资产核算纳入生态文明绩效考核[4-6],利用生态资产厘清生态本底、评估生态保护效益的现实需求十分迫切[7]。

生态资产评估方法主要集中在以自然资源为主的存量评估与以生态系统服务价值为主的流量核算[8-9]。Constanza等[10]结合生态经济学提出了生态系统服务价值理论,谢高地等[11]建立了基于专家知识的生态系统服务价值估算方法,后改进为基于单位面积价值当量因子[12-14],欧阳志云等[15]、宋昌素等[16]进一步提出了核算自然资源的生态资产实物量核算法。已有研究基于生态系统生产总值核算体系、采用当量因子法测算不同地区、不同生态系统的生态资产流量[17-20],并在内蒙古[8]、山南市[21]、屏边县[4]等地区开展生态资产存量评估,表明利用生态资产衡量生态状况得到广泛应用,生态资产可作为评估生态保护效益的重要指标。然而,目前尚未形成统一标准的生态资产核算体系,同时核算生态资产存量和流量的研究较少[22],尤其在存量评估方面多以实物量核算表、损益表反映生态保护成效[23],难以掌握生态资产质量与损益的时空分异,因此,对生态资产存量和流量开展基于栅格尺度的量化核算是评估生态保护效益的关键。

湟水流域作为黄河上游最大支流,位于青藏高原与黄土高原的过渡带,生态地理位置十分重要,是黄河上游生态安全屏障的重要组成部分,是全球气候变化敏感的地区之一,也是青海省政治经济中心,聚集着全省近60%的人口,工农业生产总额约占全省总额的60%,生态环境压力大,是国家及地方各类生态保护政策与工程的重点实施地区,近年来更是不断加强山水林田湖草沙一体化保护。其生态保护有利于维护青海省经济社会发展,对维护黄河上游的生态安全具有重要意义。目前,反映湟

收稿日期：2023-02-03； **修订日期：**2023-07-15
基金项目：国家自然科学基金项目(41001055)；中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2019YSKY-026)
作者简介：孙冰清(1997-),女,硕士研究生,主要从事生态遥感. E-mail: 1270492081@qq.com
通讯作者：杜加强. E-mail: dujq@craes.org.cn

水流域生态安全与保护效益的相关研究仅从生态资产流量角度衡量了生态系统服务供需关系[24]与生态系统服务价值[25-27]，存量角度评估青海省省域[16]，较少有结合生态资产存量和流量对湟水流域生态保护效益进行评估。

本研究以湟水流域为评估单元，基于栅格尺度核算了生态资产存量与流量，分析2000—2020年生态资产时空动态变化及引起损益的驱动因素，评估生态保护效益，以期为流域评价生态保护修复成效提供参考，为进一步开展生态保护和修复提供科学指导。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

青海省湟水流域位于青海省东部，地形复杂，东宽西窄，以黄土丘陵和沟壑地貌为主，属温带大陆性气候，年平均气温0.6~7.9 ℃，多年平均降水量300~500 mm[27]。流域南侧为湟水干流，北侧为大通河支流，自西北向东南经天峻县、刚察县、门源回族自治县、祁连县、海晏县、湟源县、西宁市、互助县、平安区、乐都县和民和县。2020年湟水流域生态资产类型包括森林、灌丛、草地、河流、农田、建设用地、湿地、冰川积雪和裸地(图1)。

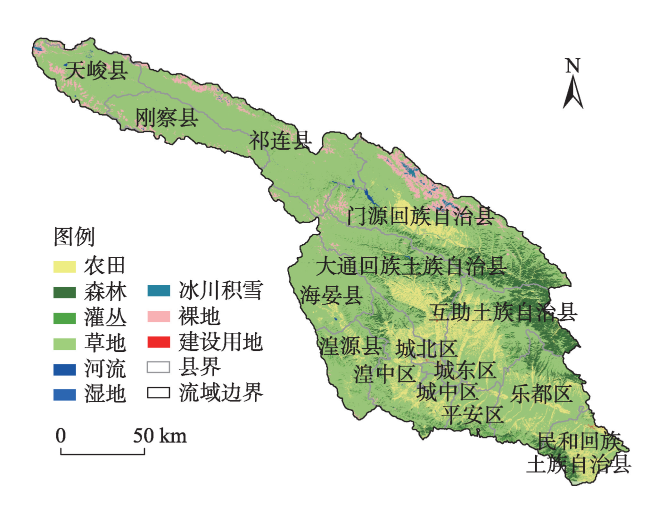


图1 湟水流域生态资产类型

Fig. 1 Ecological assets of Huangshui Basin

1.2 数据来源

综合考虑数据的可用性，土地覆盖数据采用中国30 m年度土地覆盖数据集产品(http://doi.org/10.5281/zenodo.4417809)；地上生物量、海拔、坡度、土壤质地、夜间灯光和道路空间数据源自资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)；降水和温度数据来自国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn/)；蒸散发数据来源于GLEAM v3数据集(http://www.gleam.eu/)；土壤有机质数据来源于时空三极环境大数据平台(http://poles.tpdc.ac.cn/zh-hans/)；净初级生产力(Net Primary Production，NPP)数据来源于MOD17A3H 006产品(https://lpdaac.usgs.gov/products/mod17a3hgfv006/)；碳密度数据基于2010s中国陆地生态系统碳密度数据集(http://nesdc.org.cn/sdo/detail?id=5fa53685042ebb70d0c8340b)；植被覆盖度等遥感植被指数通过对生长季(5—9月)Landsat影像大气校正和波段计算获得；水质数据来源《青海省水资源公报》；社会经济数据来源《中国县域统计年鉴》《青海省统计年鉴》和《全国农产品成本收益资料汇编》。

1.3 研究方法

1.3.1 *生态资产基本状况分析* 为准确反映生态资产存量变化，采用生态资产综合指数作为指标，从面积和质量两方面进行核算[4]。

$$EQ_i = \frac{\sum (EA_{ij} \times j)}{(EA_i \times 5)} \times \frac{EA_i}{9600000} \times 10^4 \quad (1)$$

$$EQ = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{5}(EA_{ij} \times j)}{(\sum_{i=1}^{n} EA_i \times 5)} \times \frac{\sum_{i=1}^{n} EA_i}{9600000} \times 10^4 \quad (2)$$

式中：EQ为区域生态资产综合指数；EQ_i为第i类生态资产综合指数；i为生态资产类型；j为质量等级指数；n为生态系统类型；EA_{ij}为第i类生态资产第j等级的面积；EA_i为第i类生态资产的面积。

据研究区的实际情况，生态资产质量评价方面，采用相对生物量密度[4-5,16]、植被覆盖度[5]、水质等级[6]和坡度[23]作为评价指标(表1)。

1.3.2 *生态资产流量价值量化评估方法* 以谢高地等[13]研究的全国单位面积生态系统服务价值当量因子表为基础，利用NPP、产水量和土壤保持调节因子修正，构建湟水流域2000—2020年单位面积价值当量因子表(表2)进行生态资产流量价值量评估。其中，1个标准单位生态系统生态服务价值当量因子参照三大粮食产量的单位面积经济价值[11]，2000年、2010年、2020年分别为1344.57元·hm^{-2}、3505.33元·hm^{-2}、3884.36元·hm^{-2}。土壤保持量采用修正通

表1 生态资产评价指标和分级标准

Tab. 1 Evaluation index and grading standard of ecological assets quantity

生态资产	评价指标	质量等级				
		优	良	中	差	劣
森林	相对生物量密度	≥80%	60%~80%	40%~60%	20%~40%	<20%
河流	水质	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类	Ⅳ类	Ⅴ类、劣Ⅴ类
农田	坡度	<2°	2°~6°	6°~15°	15°~25°	≥25°
其他	覆盖度	≥80%	60%~80%	40%~60%	20%~40%	<20%

表2 2000—2020年湟水流域生态系统服务价值当量因子

Tab. 2 Ecosystem service equivalent value per unit area in Huangshui Basin from 2000 to 2020

类型	年份	供给服务			调节服务				支持服务			文化服务
		食物生产	原料生产	水资源供给	气体调节	气候调节	净化环境	水文调节	土壤保持	维持养分循环	生物多样性	美学景观
农田	2000	0.49	0.23	0.01	0.38	0.21	0.06	0.12	0.32	0.07	0.07	0.03
	2010	0.40	0.19	0.01	0.32	0.17	0.05	0.15	0.56	0.06	0.06	0.03
	2020	0.45	0.21	0.01	0.36	0.19	0.05	0.17	0.82	0.06	0.07	0.03
森林	2000	0.08	0.18	0.10	0.59	1.75	0.51	1.22	0.26	0.06	0.65	0.28
	2010	0.09	0.21	0.12	0.69	2.06	0.60	1.51	0.48	0.06	0.76	0.33
	2020	0.09	0.22	0.14	0.73	2.18	0.64	1.67	0.66	0.07	0.81	0.35
灌丛	2000	0.09	0.19	0.09	0.64	1.91	0.58	1.38	0.06	0.06	0.71	0.31
	2010	0.10	0.23	0.11	0.75	2.26	0.68	1.72	0.14	0.07	0.84	0.37
	2020	0.11	0.24	0.13	0.80	2.41	0.73	1.99	0.16	0.07	0.89	0.39
草地	2000	0.05	0.08	0.09	0.28	0.73	0.24	1.06	0.33	0.03	0.31	0.14
	2010	0.05	0.07	0.11	0.27	0.71	0.23	1.37	0.58	0.03	0.29	0.13
	2020	0.06	0.08	0.13	0.29	0.75	0.25	1.53	0.80	0.03	0.31	0.14
湿地	2000	0.33	0.32	1.39	1.21	2.30	2.30	13.00	0.15	0.11	5.02	3.02
	2010	0.22	0.21	1.84	0.81	1.53	1.53	17.21	0.18	0.08	3.35	2.01
	2020	0.27	0.26	1.95	1.00	1.90	1.90	18.28	0.50	0.09	4.14	2.49
裸地	2000	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.07	0.04	0.00	0.00	0.01	0.01
	2010	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.09	0.05	0.01	0.00	0.02	0.01
	2020	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.06	0.05	0.01	0.00	0.01	0.01
河流	2000	0.82	0.23	30.06	0.79	2.34	5.66	70.71	35.42	0.07	2.60	1.93
	2010	0.72	0.21	40.52	0.69	2.05	4.98	89.69	49.88	0.06	2.29	1.69
	202	0.77	0.22	45.42	0.74	2.21	5.36	90.12	64.18	0.07	2.46	1.82
冰川积雪	2000	0.00	0.00	1.62	0.09	0.27	0.08	5.35	0.00	0.00	0.01	0.05
	2010	0.00	0.00	2.36	0.12	0.35	0.10	7.80	0.00	0.00	0.01	0.06
	2020	0.00	0.00	2.89	0.16	0.47	0.14	9.54	0.00	0.00	0.01	0.08

用土壤流失方程计算[28]。

$$E=R\times K\times LS\times(1-C\times P) \tag{3}$$

式中:E为单位面积土壤保持量($t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$);$R$为降雨侵蚀力因子($MJ\cdot hm^{-2}\cdot h^{-1}\cdot a^{-1}$);$K$为土壤可蚀性因子($t\cdot h\cdot MJ^{-1}\cdot mm^{-1}$)[29];$LS$为坡度坡长因子;$C$为植被覆盖因子[30];$P$为水土保持措施因子[31-32]。产水量采用区域水分的输入量与输出量之差表征[33-34],通过降水量减蒸散量计算[25]。

1.3.3 *生态资产损益及其驱动因素分析方法* 生态资产损益是核算期内生态资产流量价值的减损或增益[7]。根据研究区实际情况,选取降水、温度、人口、GDP、夜间灯光、碳储量、生境质量、海拔和坡度9个因子,采用皮尔逊相关性分析识别引起生态资产损益的主要因素,借助地理探测器进一步揭示因子的相对贡献度。其中,碳储量依据样地调查成果,建立碳储量与多种遥感植被指数(包括归一化

植被指数、土壤植被指数等)的地理加权回归关系模型,反演估算整个区域的碳储量[35];生境质量利用InVEST模型的生境质量模块,构建土地利用与道路等胁迫因子的关系[36]进行计算。

2 结果与分析

2.1 生态资产基本状况的时空分异特征

2020年湟水流域生态资产综合指数为30.98,生态资产存量总体呈现东南平原低、西北山地高的分布格局(图2,图3),高值区以草地为主,低值区以农田为主。2000—2020年由于森林、草地和河流面积显著增加、质量提高,生态资产综合指数提高了1.95,约31%的区域存量明显增长,主要位于流域东南部。

2.2 生态资产流量价值的空间分异特征

2020年湟水流域生态资产流量价值量为1073.74×10^{8}元,单位面积平均价值为326.36×10^{4}元·km^{-2},高值主要位于流域四周的草地和森林,而湟水河沿岸各项价值均低于平均水平(图4)。其中,草地生态资产价值最高,占总价值的56.07%,调节服务价值尤为显著,占69.50%(图5)。

2.3 生态资产损益及其驱动因素分析

2000—2020年湟水流域生态资产流量价值整体以增益为主,西部增长量大于东部,共增加了831.17×10^{8}元,增幅342.65%(图6)。主要提升的是调节服务和支持服务,河流和草地生态资产价值量增长显著。生态资产损益的驱动因素分析显示,除碳储量外,其他驱动因素均显著相关(图7)。GDP增幅明显(图8),GDP对生态资产增益的平均贡献度(14.51%)最大,尤其是对河流、湿地、森林和灌丛影响明显。总的来说,社会经济因素(平均贡献度为12.95%)相较自然因素(平均贡献度10.52%)对生态资产增益影响力更大。

3 讨 论

湟水流域生态资产综合指数是青海省(278.22)的1/9,面积仅占1/22[16],存量核算结果较整个青海省偏高,差异主要因本文将河流与农田纳入评价体

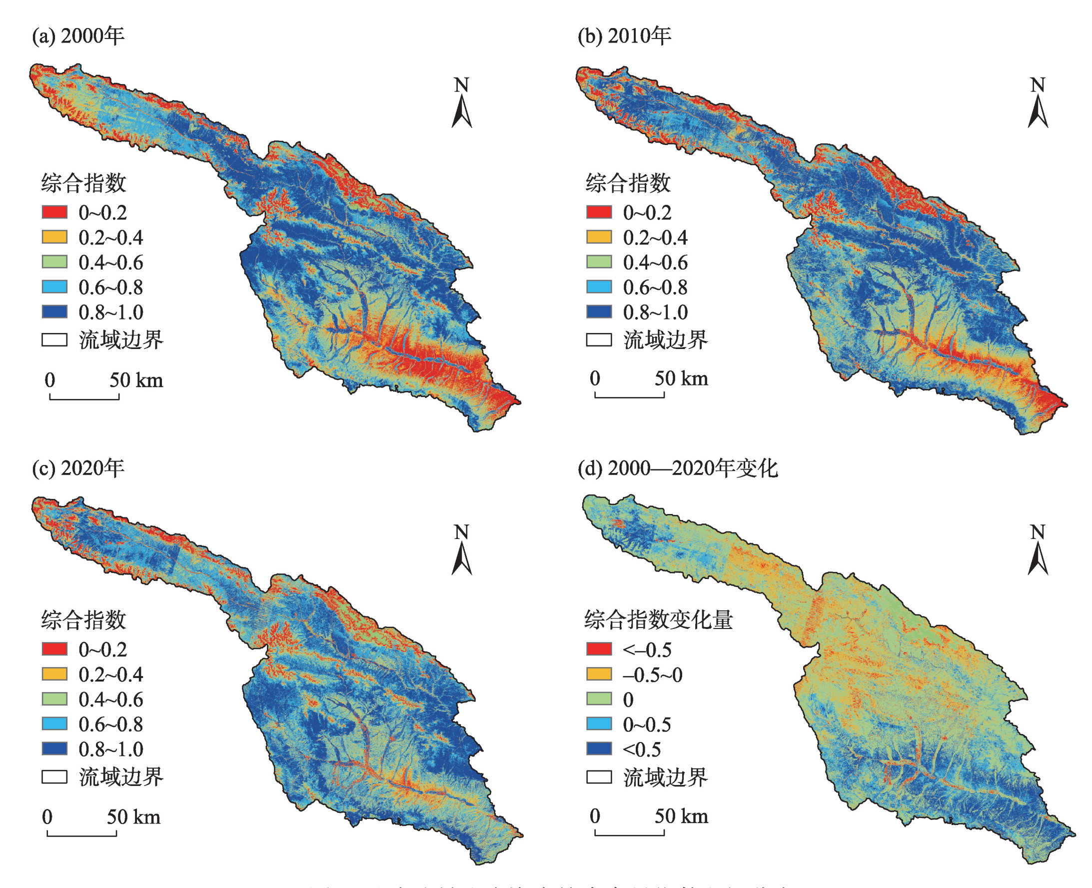


图2 湟水流域生态资产综合存量指数空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of ecological assets comprehensive stock index in Huangshui Basin

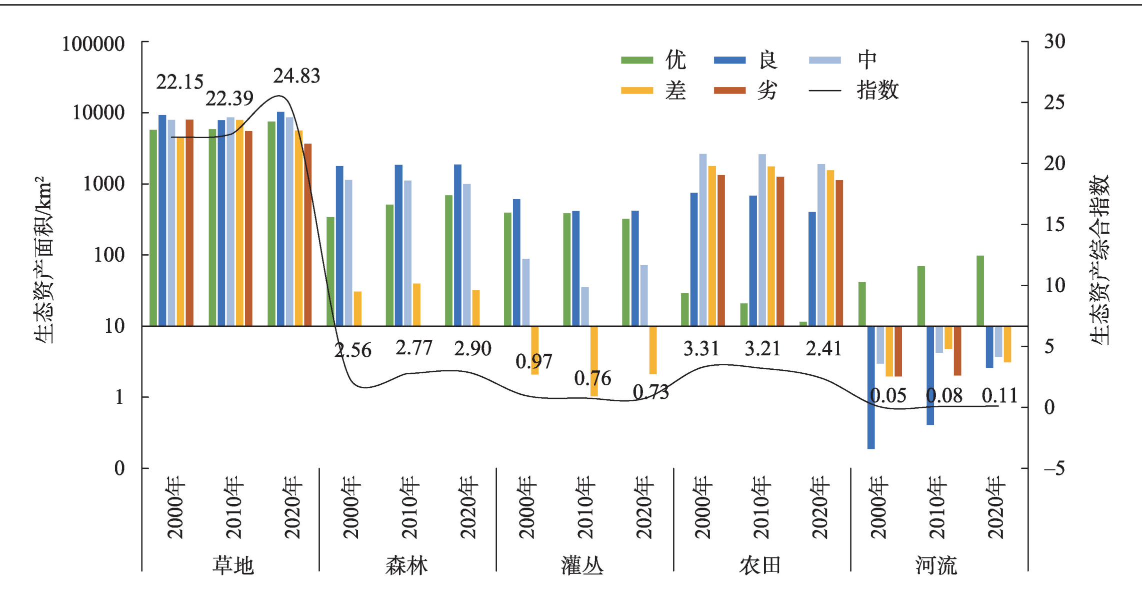


图3　湟水流域主要生态资产存量变化统计

Fig. 3　Variation statistics of main ecological assets stock in Huangshui Basin

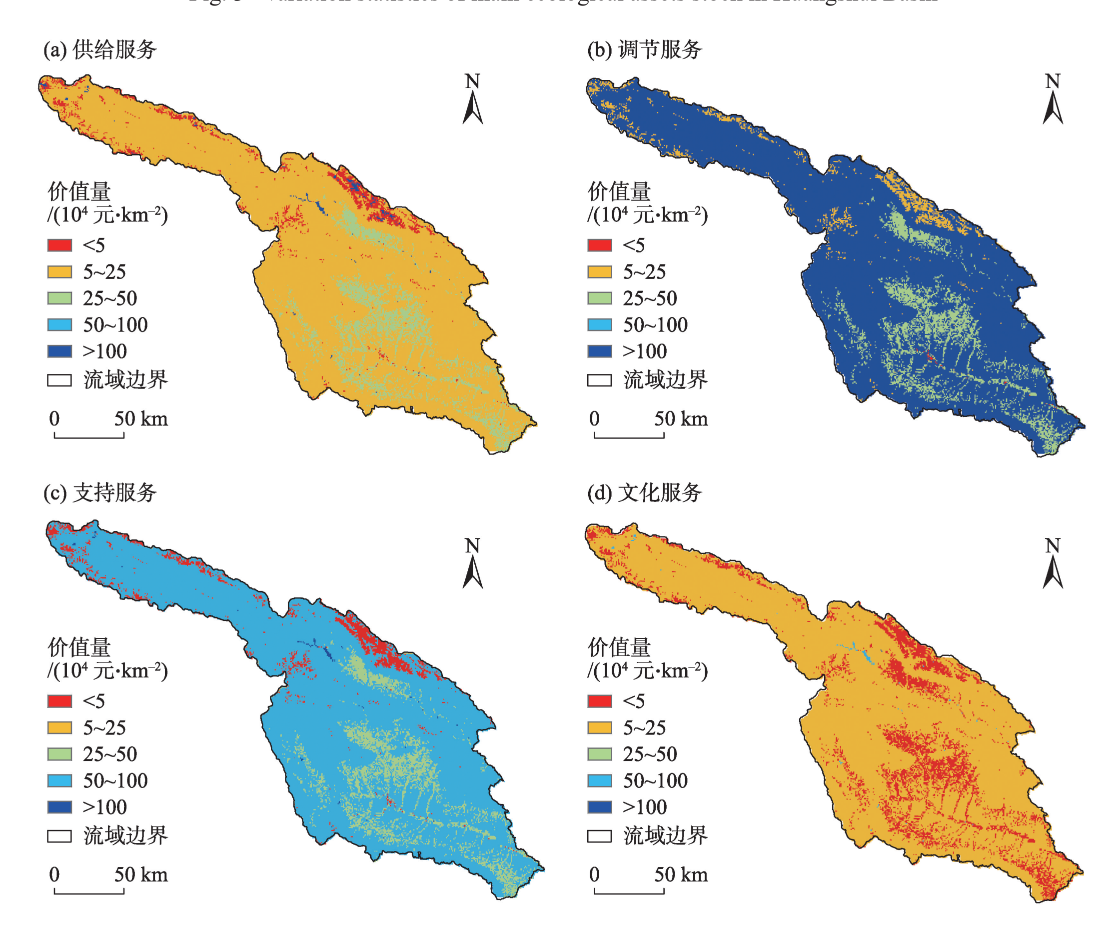


图4　2020年湟水流域生态资产流量价值空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of ecological asset flow value in Huangshui Basin in 2020

系。单位面积生态资产流量价值低于黄河流域青海段(80.52×10^4~999.15×10^4 元·km^{-2})[17],主要是核算方法不同,黄河流域青海段基于生态系统生产总值核算体系估算,标准单位价值为固定值,而本文基于单位面积当量因子法,标准单位价值当量因子参照对应年份粮食收益。

生态资产变化可直观地反映区域生态保护成效[8]。近20 a湟水流域持续实施了湟水河生态修复

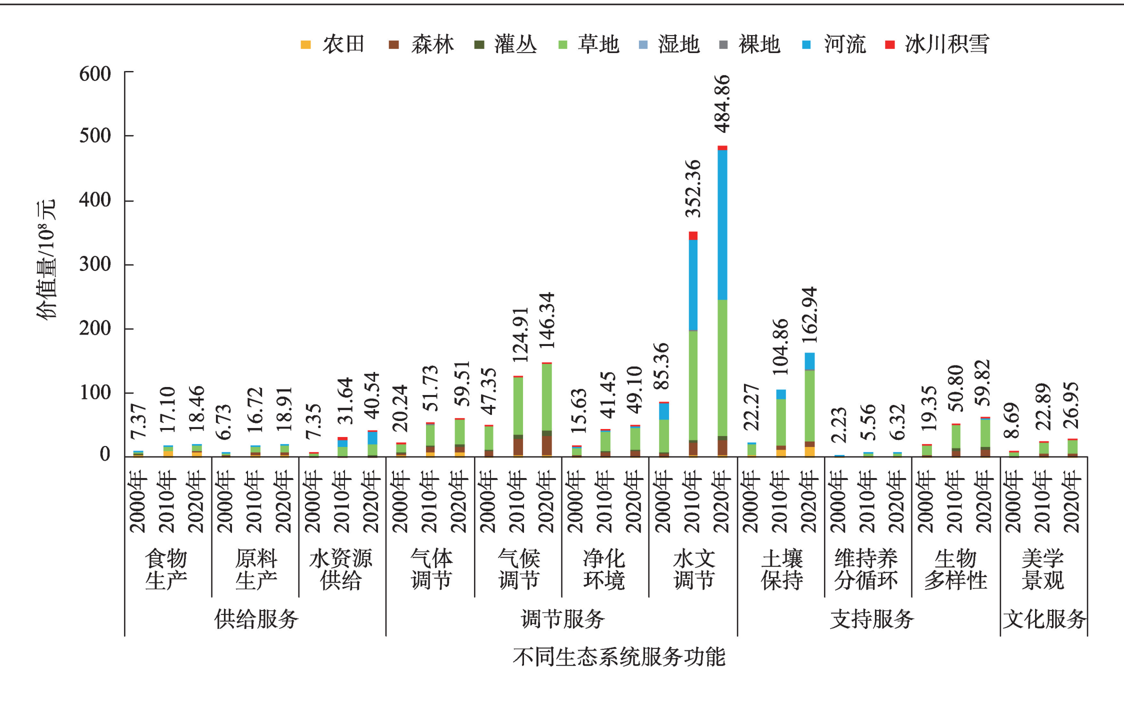


图5 湟水流域生态资产流量价值变化

Fig. 5 Variation of ecological asset flow value in Huangshui Basin

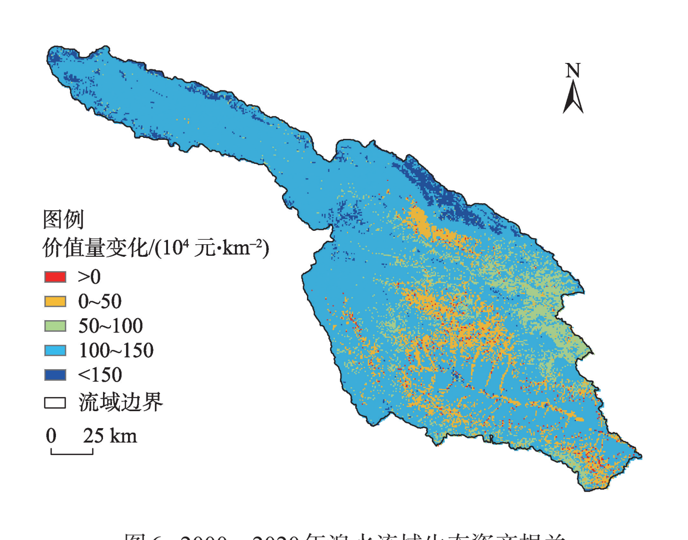


图6 2000—2020年湟水流域生态资产损益

Fig. 6 Ecological assets gains and losses in Huangshui Basin from 2000 to 2020

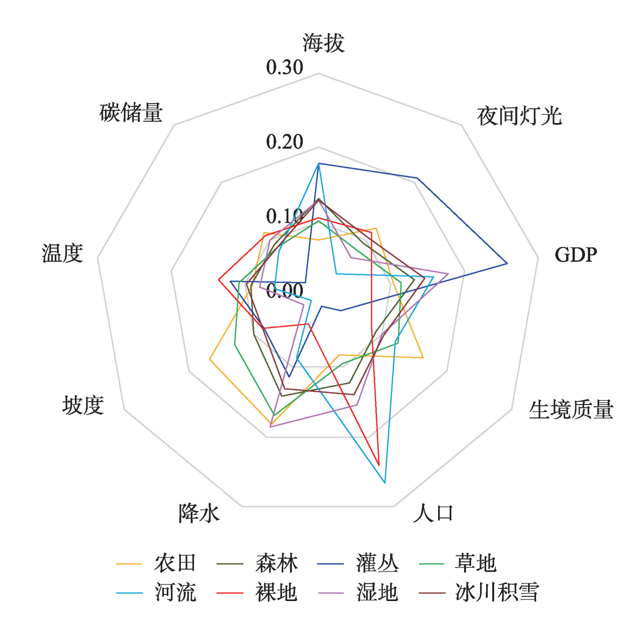


图7 各驱动因素对生态资产损益的相对贡献度

Fig. 7 The relative contribution of each driving factor to the profit and loss of ecological assets

治理工程、退耕还林还草等生态保护工程[27]。已有研究表明，流域内开展大规模的生态保护工程使生态资产存量增加、质量提升[17]，生态流量价值呈现持续增长态势，草地、森林等生态用地在自然和社会因素共同作用下逐渐恢复[26−27]，区域生态保护成效已逐步显现，本文印证了以上结论。过去20 a流域内所有区县生态保护成效均已显现(表3)，6个区县单位面积生态流量价值增长超100×10⁴元·km⁻²，分布在西宁市建城区及流域西北部，增长主要来源于森林和草地恢复，说明森林和草地是流域生态保护的关键；而流域中部及东部的民和县、互助县、大通县、湟中区、乐都区和平安区，虽草地、森林生态保护恢复取得明显成果，但农业开发较多，单位面积生态流量价值增长相对较低，应严格遵守耕地红线政策，不适合农业的坡耕地进行退耕还林；同时，各区县河流湿地保护还有很大提升空间，河流湿地具

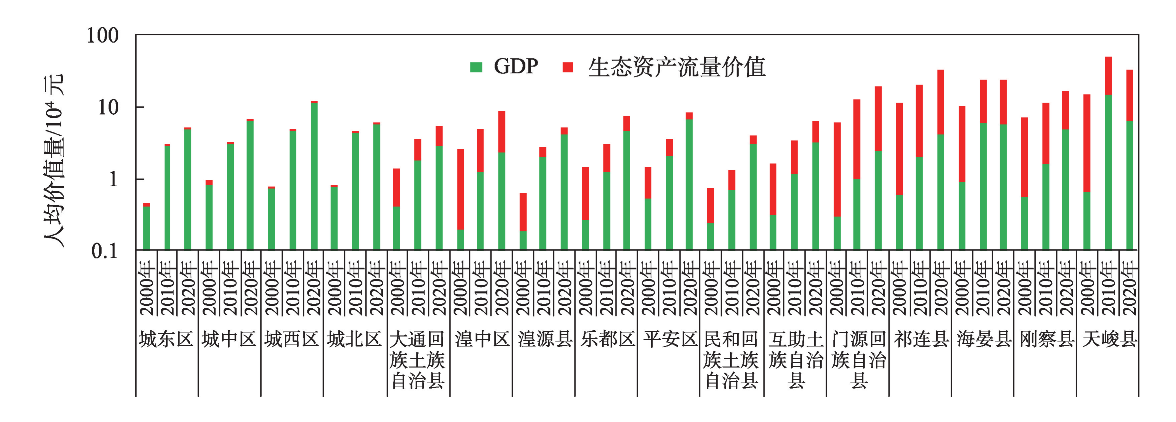


图8 湟水流域人均GDP与人均生态资产流量价值

Fig. 8 Per capita GDP and per capita ecological asset flow value in Huangshui Basin

表3 2000—2020年湟水流域区县生态保护监测

Tab. 3 Ecological protection monitoring in Huangshui Basin from 2000 to 2020

区县	农业开发/km²	森林恢复/km²	草地恢复/km²	河流湿地恢复/km²	灌丛恢复/km²	单位面积价值量变化/(10⁴元·km⁻²)
城东区	6.87	0.33	19.46	0.02	0.52	103.35
城中区	2.83	0.14	44.19	0.04	0.65	98.13
城西区	2.88	0.20	15.67	0.01	0.37	103.69
城北区	4.53	0.06	45.24	0.04	1.02	90.59
大通县	58.05	78.24	400.02	0.36	3.04	86.99
湟中区	51.87	55.69	537.44	0.48	0.30	85.96
湟源县	14.08	19.97	126.34	0.11	0.04	94.68
乐都区	69.43	73.55	150.22	0.14	0.68	87.33
平安区	13.02	27.57	90.80	0.08	0.27	88.78
民和县	93.96	48.00	138.72	0.12	4.74	75.57
互助县	64.16	66.77	470.31	0.42	0.39	78.68
门源县	44.06	102.91	282.18	0.25	3.01	100.26
祁连县	0.12	3.67	74.35	0.07	2.50	107.33
海晏县	22.48	2.12	47.40	0.04	2.15	99.88
刚察县	0.00	0.24	28.01	0.03	0.08	104.82
天峻县	0.00	0.00	28.32	0.03	0.00	102.42

有重要的调节功能，未来应继续湟水河生态修复工程，提高流域水文生态效益。

此外，湟水流域生态资产损益驱动影响力在空间上差异明显[24-25,27]。尤其是影响力更大的社会经济因素，2000—2020年人均GDP和人均生态资产流量价值分别增幅1004.26%、285.11%，区县间增长差异明显，西宁市建城区人均GDP和人均生态资产流量价值仅增长了953.28%、16.06%（图8）。这表明湟水流域生态资产虽增益显著，但相对社会经济增速明显缓慢，生态资产与经济发展不平衡，空间分异显著，局地生态保护效益跟不上经济发展的速度。在发展经济的过程中应注意分区制定生态保护与补偿政策，着重提高西宁市、平安区、乐都区等城市建设区的生态保护力度。

本研究基于栅格尺度核算了湟水流域生态资产存量与流量，实现了生态资产的综合量化，结果可靠性有所加强，核算结果在区域生态保护成效评估方面有重要应用价值，可为流域生态修复和治理提供基础数据与理论指导，同时也为其他地区开展生态保护效益评估提供方法参考。但受统计数据限制，研究只考虑了森林、草地、河流等主要生态资产，河流生态资产质量仅用监测断面数据评估，且未考虑农田生态资产的作物生产力，结果有一定局限性，未来应进一步深入研究。

4 结 论

本文通过对湟水流域生态资产的存量和流量核算，揭示了流域生态效益状况，评估了流域生态保护成效，主要结论如下：

（1）从存量来看，2020年湟水流域生态资产综合指数为30.98，总体呈现东南平原低、西北山地高的分布格局，以草地生态资产为主。2000—2020年生态资产综合指数提高了6.71%，生态资产质量整体提升。

（2）从流量来看，2020年生态资产流量价值约为1073.47×10^{8}元，调节服务价值占69.50%。2000—2020年生态资产以增益为主，共增加了831.16×10^{8}元，其中河流生态系统服务价值增加176.08×10^{8}元，调节服务价值增加了236.58×10^{8}元。

（3）从影响因素来看，社会经济因素（平均贡献度为12.95%）相较自然因素（平均贡献度10.52%）对生态资产增益影响力更大，且其影响力在空间上差异明显。

（4）总体上，湟水流域实施的一系列生态保护措施与政策已取得一定的成果，极好地保护了植被与水域的恢复，改善了生态环境，提升了整个流域的生态资产状况。但由于自然本底限制与经济发展的不平衡，部分地区生态保护压力依然很大，在发展经济的过程中要注意分区制定生态保护与补偿政策，加大天峻县、祁连县、刚察县等区县的生态补偿政策实施力度，着重提高西宁市、平安区、乐都区等城市建设区的生态保护力度。

参考文献（References）：

[1] 刘焱序, 傅伯杰, 赵文武, 等. 生态资产核算与生态系统服务评估: 概念交汇与重点方向[J]. 生态学报, 2018, 38(23): 8267-8276. [Liu Yanxun, Fu Bojie, Zhao Wenwu, et al. Ecological asset accounting and ecosystem services evaluation: Concept intersection and key research priorities[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(23): 8267-8276.]

[2] Ouyang Z Y, Zhang H, Xiao Y, et al. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital[J]. Science, 2016, 352(6292): 1455-1459.

[3] 谢高地. 生态资产评价: 存量、质量与价值[J]. 环境保护, 2017, 45(11): 18-22. [Xie Gaodi. Ecological asset evaluation: Stock, quality and value[J]. Environmental Protection, 2017, 45(11): 18-22.]

[4] 游旭, 何东进, 肖燚, 等. 县域生态资产核算研究——以云南省屏边县为例[J]. 生态学报, 2020, 40(15): 5220-5229. [You Xu, He Dongjin, Xiao Yan, et al. Assessment of eco-assets in a county area: A case of Pingbian County[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(15): 5220-5229.]

[5] 博文静, 肖燚, 王莉雁, 等. 生态资产核算及变化特征评估——以内蒙古兴安盟为例[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5425-5432. [Bo Wenjing, Xiao Yan, Wang Liyan, et al. Assessment of the status of ecological assets and variation of its characteristics: A case study of Hinggan League, Inner Mongolia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5425-5432.]

[6] 张丽云, 郭克疾, 李炳章, 等. 唐古拉山以北地区生态资产核算[J]. 生态学报, 2020, 40(10): 3229-3235. [Zhang Liyun, Guo Keji, Li Bingzhang, et al. Ecological asset accounting in north district of Tanggula Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(10): 3229-3235.]

[7] 李佳慧, 黄麟, 曹巍, 等. 长三角重点生态功能县域生态资产损益核算[J]. 自然资源学报, 2022, 37(8): 1946-1960. [Li Jiahui, Huang Lin, Cao Wei, et al. Accounting of gains and losses of ecological assets in counties of key ecological function regions in Yangtze River Delta[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(8): 1946-1960.]

[8] 邱晓, 肖燚, 石磊, 等. 基于生态资产的内蒙古生态保护效益评估[J]. 生态学报, 2022, 42(13): 5255-5263. [Qiu Xiao, Xiao Yan, Shi Lei, et al. Assessment of ecological conservation benefit in the Inner Mongolia based on ecological assets[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(13): 5255-5263.]

[9] 李佳慧, 黄麟, 曹巍. 中国县域生态资产损益的影响机制及优化提升路径[J]. 地理学报, 2022, 77(5): 1260-1274. [Li Jiahui, Huang Lin, Cao Wei. The influencing mechanism of ecological asset gains and losses at the county level in China and its optimization and promotion paths[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(5): 1260-1274.]

[10] Constanza R, D'arge R, Gtoot R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Ecological Economics, 1997, 25(1): 3-15.

[11] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919. [Xie Gaodi, Zhen Lin, Lu Chunxia, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(5): 911-919.]

[12] Xie G D, Li W H, Xiao Y, et al. Forest ecosystem services and their values in Beijing[J]. Chinese Geographical Science, 2010, 20(1): 51-58.

[13] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254. [Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1243-1254.]

[14] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值[J]. 资源

科学, 2015, 37(9): 1740-1746. [Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Changshun, et al. The value of ecosystem services in China[J]. Resources Science, 2015, 37(9): 1740-1746.]

[15] 欧阳志云, 林亦晴, 宋昌素. 生态系统生产总值(GEP)核算研究——以浙江省丽水市为例[J]. 环境与可持续发展, 2020, 45(6): 80-85. [Ouyang Zhiyun, Lin Yiqing, Song Changsu. Research on Gross Ecosystem Product (GEP): Case study of Lishui City, Zhejiang Province[J]. Environment and Sustainable Development, 2020, 45(6): 80-85.]

[16] 宋昌素, 肖燚, 博文静, 等. 生态资产评价方法研究——以青海省为例[J]. 生态学报, 2019, 39(1): 9-23. [Song Changsu, Xiao Yan, Bo Wenjing, et al. The ecological asset accounting method study: A case study of Qinghai Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(1): 9-23.]

[17] 宋昌素, 欧阳志云. 面向生态效益评估的生态系统生产总值GEP核算研究——以青海省为例[J]. 生态学报, 2020, 40(10): 3207- 3217. [Song Changsu, Ouyang Zhiyun. Gross Ecosystem product accounting for ecological benefits assessment: A case study of Qinghai Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(10): 3207-3217.]

[18] Ouyang Z Y, Song C S, Zheng H, et al. Using gross ecosystem product (GEP) to value nature in decision making[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(25): 14593-14601.

[19] Verhofstadt E, Ootegem L V, Defloor B, et al. Linking individuals' ecological footprint to their subjective well- being[J]. Ecological Economics, 2016, 127: 80-89.

[20] Geng J, Liang C. Analysis of the internal relationship between ecological value and economic value based on the forest resources in China[J]. Sustainability, 2021, 13(12): 6795.

[21] 张籍, 郭泺, 宋昌素, 等. 青藏高原地区生态资产核算研究——以西藏自治区山南市为例[J]. 生态学报, 2021, 41(22): 9095-9102. [Zhang Ji, Guo Li, Song Changsu, et al. Assessment of ecosystem assets in Qinghai-Tibet Plateau: A case study of Shannan City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(22): 9095-9102.]

[22] 董天, 张路, 肖燚, 等. 鄂尔多斯市生态资产和生态系统生产总值评估[J]. 生态学报, 2019, 39(9): 3062- 3074. [Dong Tian, Zhang Lu, Xiao Yan, et al. Assessment of ecological assets and gross ecosystem product value in Ordos City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): 3062-3074.]

[23] 白杨, 李晖, 王晓媛, 等. 云南省生态资产与生态系统生产总值核算体系研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(7): 1100-1112. [Bai Yang, Li Hui, Wang Xiaoyuan, et al. Evaluating natural resource assets and gross ecosystem products using ecological accounting system: A case study in Yunnan Province[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(7): 1100-1112.]

[24] 占湉, 于洋, 吴秀芹. 湟水流域生态系统服务供需匹配关系[J]. 生态学报, 2021, 41(18): 7260-7272. [Zhan Tian, Yu Yang, Wu Xiuqin. Supply-demand spatial matching of ecosystem services in the Huangshui Ríver Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41 (18): 7260-7272.]

[25] 谢保鹏, 杨洁, 陈英, 等. 黄河流域甘青段生态系统服务权衡协同关系[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2022, 58(4): 443-450. [Xie Baopeng, Yang Jie, Chen Ying, et al. Trade-off and synergy of ecosystem services in Gansu-Qinghai section of the Yellow River Basin[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2022, 58(4): 443-450.]

[26] 马元希, 于德永, 王欣烨, 等. 黄河青海流域生态系统服务价值评估方法研究及时空变化分析[J]. 青海民族大学学报(社会科学版), 2022, 48(2): 70-82. [Ma Yuanxi, Yu Deyong, Wang Xinye, et al. The spatiotemporal change of ecosystem service valuein the Yellow River Basin[J]. Journal of Qinghai Minzu University (Social Sciences), 2022, 48(2): 70-82.]

[27] Shi F F, Zhou B R, Zhou H K, et al. Spatial autocorrelation analysis of land use and ecosystem service value in the Huangshui River Basin at the grid scale[J]. Plants- basel, 2022, 11(17): 2223-2247.

[28] Renard K G. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[M]. United States: Agricultural Research Service, 1997: 375-384.

[29] Williams J R, Jones C A, Dyke P T. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity[J]. Transactions of the ASAE, 1984, 27(1): 129-144.

[30] Feng L Y, Zhi H S, Zhao X L, et al. Estimating interrill soil erosion from aggregate stability of Ultisols in subtropical China[J]. Soil & Tillage Research, 2008, 100(1): 34-41.

[31] Angulo-martinez M, Begueria S. Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: A comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain) [J]. Journal of Hydrology, 2009, 379(1/2): 111-121.

[32] 赵蒙恩, 闫庆武, 刘政婷, 等. 鄂尔多斯市土壤侵蚀时空演变及影响因子分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1819-1831. [Zhao Meng'en, Yan Qingwu, Liu Zhengting, et al. Analysis of temporal and spatial evolution and influencing factors of soil erosion in Ordos City[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(6): 1819-1831.]

[33] 王雅, 蒙吉军. 黑河中游土地利用变化对生态系统服务的影响[J]. 干旱区研究, 2017, 34(1): 200-207. [Wang Ya, Meng Jijun. Effects of land use change on ecosystem services in the middle reaches of the Heihe River Basin [J]. Arid Zone Research, 2017, 34(1): 200-207.]

[34] 姬倩倩, 潘换换, 吴树荣, 等. 山西黄河流域"三生"空间重构和降水变化对产水服务的影响[J]. 干旱区研究, 2023, 40(1): 132-142. [Ji Qianqian, Pan Huanhuan, Wu Shurong, et al. Effect of spatial reconstruction of "production- living- ecology" space and precipitation changes on water yield services in the Yellow River Basin in Shanxi Province[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(1): 132-142.]

[35] 龙依, 蒋馥根, 孙华, 等. 基于带宽优选地理加权回归模型的深圳市植被碳储量反演[J]. 生态学报, 2022, 42(12): 4933−4945. [Long Yi, Jiang Fugen, Sun Hua, et al. Estimating vegetation carbon storage based on optimal bandwidth selected from geographically weighted regression model in Shenzhen City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(12): 4933−4945.]

[36] Wu L L, Sun C G, Fan F L, et al. Estimating the characteristic spatiotemporal variation in habitat quality using the InVEST model-a case study from Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area [J]. Remote Sensing, 2021, 13(5): 2072−2092.

Assessment of ecological protection benefits in the Huangshui River Basin based on ecological assets

SUN Bingqing[1], DU Jiaqiang[1], MAO Jialin[1,2], ZHANG Jing[1,2], SHENG Zhilu[1], ZHANG Yangchengsi[1]

(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. College of Ecology, Lanzhou University, Lanzhou 712100, Gansu, China)

Abstract: Ecological assets refer to ecological systems that provide benefits and services to human beings. Assessing changes in ecological assets can objectively reveal the effectiveness of ecological protection efforts. Situated in the transition area between the Qinghai-Tibet Plateau and the Loess Plateau, the Huangshui River Basin has a fragile and sensitive ecological environment. It also has the highest population density and socioeconomic intensity in the region, making it the key area for implementing ecological protection policies and projects. By calculating the stock and discharge of ecological assets in the Huangshui River Basin, we comprehensively analyze the spatiotemporal dynamic changes in ecological assets in the watershed, investigate the driving factors behind the gains and losses in ecological assets using the geographical detectors model, and explore the ecological protection benefits in combination with different ecological protection measures. The results are as follows: (1) The comprehensive index of ecological assets in the Huangshui River Basin in 2020 was 30.98, showing a distribution pattern of low ecological assets in the southeast plain and high ecological assets in the northwest mountains. From 2000 to 2020, the comprehensive index of ecological assets increased by 6.71%, indicating an overall improvement in the quality of ecological assets. (2) In 2020, the ecological asset flow value of the Huangshui River Basin was approximately 107.374 billion yuan, with the regulation service value accounting for 69.50%. Over the past 20 years, ecological assets have increased by 83.116 billion yuan, of which 57.123 billion yuan was attributed to regulating services. The regulation of grassland ecological resources primarily contributed to the flow value, which is also influenced by the stock quality of ecological assets. (3) There was a notable spatial difference in the driving influence of ecological asset profit and loss in the Huangshui River Basin. Socioeconomic factors (average contribution of 12.95%) impacted ecological asset profit and loss more than natural factors (average contribution of 10.54%). (4) Ecological assets in the Huangshui River Basin have shown steady improvement, and considerable success has been achieved in ecological protection and restoration. However, the region faces challenges due to the imbalance between natural background restrictions and economic development, leading to significant spatial differentiation in ecological assets and continued pressure on local ecological protection. This study is of great significance for understanding the ecological status of the Huangshui River Basin and guiding the protection of its ecological assets. Overall, the ecological assets of the Huangshui River Basin have improved steadily.

Keywords: ecological assets; profit and loss of ecological assets; ecological protection benefits; Huangshui River Basin